

О.В. Грицюк, О.М. Врублевський, А.П. Кузьменко, С.С. Кузьменко

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА У СКЛАДІ ПАРАЛЕЛЬНОЇ ТА ПОСЛІДОВНОЇ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ВИКОРИСТАННЯМ AMESIM

У статті представлено результати порівняльного дослідження роботи малолітражного дизеля ЗЧН 8,8/8,2 у складі гібридної силової установки транспортного засобу. Дослідження виконано шляхом побудови імітаційних моделей у середовищі Simcenter Amesim для двох базових архітектур гібридного приводу — паралельної та послідовної. Наразі уряди багатьох країн запроваджують суворі норми щодо викидів шкідливих речовин (зокрема NOx, CO, CO₂, HC), що вимагає від виробників транспортних засобів впровадження інновацій у сфері силових агрегатів. Розробники стандарту Euro 7, який має вступити в силу у 2025 році, гарно розуміють, що посилювати де-які вимоги, наприклад до викидів твердих частинок, вже практично нікуди, а встановити ще жорсткіші обмеження на викиди NOx для дизельних автомобілів можливо, на що також було потрібно звернути увагу. Тому у межах дослідження проаналізовано вплив кожної з конфігурацій на паливну економічність, рівень викидів шкідливих речовин (CO, HC, NOx), а також загальну ефективність роботи силової установки під час типового міського й змішаного режиму руху (цикл NEDC). Особливу увагу приділено техніко-функціональній доцільності застосування малолітражного дизеля як джерела енергії в сучасній гібридній силовій системі, з урахуванням його конструктивних особливостей, характеру навантажень та адаптивності до екологічних обмежень. Отримані результати засвідчують порівнянню паливну ефективність обох схем, суттєву перевагу послідовної архітектури щодо зниження викидів CO та NOx, а також нижчий рівень HC у паралельній конфігурації. При цьому паралельна схема демонструє вищу динамічну гнучкість та здатність до адаптації у змінних режимах руху. Дослідження має прикладний характер та спрямоване на розвиток енергоефективних технологій у сфері спеціалізованих транспортних засобів військового, експедиційного або комерційного призначення, де особливо актуальним є поєднання надійності, автономності та екологічної відповідності. При цьому визначено, що дизель ЗЧН 8,8/8,2 продемонстрував задовільні техніко-експлуатаційні показники та потенціал адаптації до сучасних вимог гібридизації. Його застосування також доцільно у контексті спеціалізованого транспорту, де пріоритетом є економічність, автономність та надійність.

Ключові слова: дизель; гібридний привід; режими роботи; питома витрата палива; екологічні показники.

Вступ

Сучасний розвиток автомобілебудування характеризується динамічною еволюцією конструкцій силових установок, спрямованою на задоволення зростаючих вимог щодо енергоефективності, екологічної безпеки, надійності та адаптивності до умов експлуатації. На цьому тлі особливої актуальності набувають дослідження, пов'язані з гібридизацією силових приводів, зокрема з використанням дизельних двигунів у складі гібридних систем різної архітектури.

Проблематика забруднення навколишнього середовища транспортними засобами стала однією з ключових у глобальному контексті сталого розвитку. Уряди багатьох країн запроваджують суворі норми щодо викидів шкідливих речовин (зокрема NOx, CO, CO₂, HC), що вимагає від виробників транспортних засобів впровадження інновацій у сфері силових агрегатів. З цієї точки зору використання гібридних силових установок є одним з найефективніших підходів до досягнення компромісу між продуктивністю і екологічною безпекою.

Особливе місце в цьому процесі займає дизель-електричне гібридне компонування. На відміну від бензинових двигунів, дизелі мають вищий коефіцієнт корисної дії та кращі показники паливної економічності, особливо в умовах часткових навантажень і низьких обертів. Це робить їх привабливими для

застосування у спеціалізованому транспорті: військовому, експедиційному, промисловому. Тим не менш, дизельні агрегати мають певні недоліки, зокрема підвищені викиди NOx, що обумовлює потребу у гнучкому керуванні режимами їх роботи.

У цьому контексті важливою є оцінка ефективності дизельного двигуна при різних схемах гібридного приводу — зокрема паралельній та послідовній. Паралельна архітектура дозволяє сумісне або альтернативне використання ДВЗ та електромотора для передачі крутного моменту, в той час як у послідовній схемі ДВЗ виконує функцію генератора енергії, що живить електромотор, який є єдиним джерелом механічної енергії на колесах. Кожна з цих схем має свої переваги і недоліки, які потребують обґрунтованої техніко-економічної оцінки з урахуванням реальних умов експлуатації.

Одним з важливих аспектів досліджень у цій галузі є моделювання гібридних систем у спеціалізованому програмному середовищі. Simcenter Amesim, розроблений компанією Siemens, є потужним інструментом для створення віртуальних моделей транспортних засобів і аналізу їх динаміки, споживання енергії, викидів та інших параметрів. Можливість деталізованого налаштування всіх компонентів силової установки дозволяє отримати надійні оцінки ефективності тих чи інших рішень без необхідності дороговартісних фізичних експериментів.

Додатковий інтерес становить використання малолітражних дизельних двигунів української розробки, зокрема ЗЧН 8,8/8,2, як потенційної силової ланки гібридної установки.

Таким чином, дана стаття спрямована на дослідження ефективності дизельного двигуна ЗЧН 8,8/8,2 в складі гібридної силової установки у двох варіантах реалізації — послідовній та паралельній.

Аналіз публікацій

У процесі аналізу ефективності дизелів у складі гібридної силової установки важливим є вивчення існуючих наукових праць, що висвітлюють аспекти моделювання, оптимізації та впровадження подібних технологій у реальних умовах експлуатації.

У роботі Lee S. et al. [1] запропоновано модель дизельного двигуна з урахуванням середніх значень параметрів (mean-value engine model), адаптовану для реального часу. Це дає змогу ефективно інтегрувати такі моделі в системи керування гібридним приводом. Модель є зручною для оптимізації паливної економічності та динамічного реагування силової установки.

Дослідження Jehlik F. et al. [2] охоплює аналіз витрати палива дизельного гібридного електромобіля залежно від стилю водіння та зовнішніх умов. Авторами було встановлено, що в деяких умовах гібридизація дизельного двигуна може призводити до економії пального понад 20%, залежно від режиму експлуатації.

Праця Tsuchiya T. [3] присвячена практичному впровадженню гібридних комерційних транспортних засобів. Автор аналізує різні архітектури гібридного приводу та доводить доцільність використання дизель-електричних схем у комерційному сегменті, особливо для середньотоннажного транспорту.

Viswanath H. et al. [4] представили оптимізаційний підхід до дизельного двигуна для військових гусеничних машин. Використовуючи Matlab-Simulink,

автори здійснили параметричне налаштування двигуна з урахуванням режимів роботи, що характерні для бойових умов, довівши ефективність дизельної компоненти у складі гібридної установки.

У роботі Laurén M. et al. [5] описано створення масштабованої моделі ДВЗ для енергоефективних досліджень. Запропонована модель універсальна та дозволяє адаптувати її до різних типів двигунів, включно з дизельними силовими агрегатами, у гібридних конфігураціях.

Окрему увагу варто приділити дослідженню Ortenzi F. et al. [6], де вивчається рекуперация енергії вихлопних газів за допомогою турбін змінної геометрії. Показано, що такі технології можуть ефективно поєднуватися з дизельними двигунами у мікроавтомобілях, зменшуючи витрату пального та підвищуючи загальний ККД системи.

Сукупність зазначених джерел свідчить про актуальність дослідження гібридних силових установок із дизельною компонентою, а також про необхідність гнучкої адаптації моделей для врахування реальних умов експлуатації. Це підкреслює важливість моделювання дизель-електричних схем у сучасних програмних середовищах, таких як Simcenter Amesim.

Вибір об'єкту розрахункового дослідження

Трициліндрова версія дизеля ЗЧН 8,8/8,2 (дизель ЗДТА) у тракторному виконанні була успішно доведена до дозволу на серійне виробництво, виконавши вимоги стендових приймальних випробувань і державних випробувань у складі самохідного шасі СШ-2540 [7-9]. Авангардні автомобільні версії (дизель ЗДТНА) пройшли серію тривалих ходових випробувань у складі вітчизняних позашляховиків – двовісного ЛуАЗ-13021Д (рис.1) та плаваючого тривісного ЛуАЗ-1901Д (рис.2). Останній ще відомий під назвою «Геолог».



а) б)
Рис. 1. ЛуАЗ-13021Д (а) та ЛуАЗ-1901Д «Геолог» (б) з дизелем ЗДТНА

Сучасна розрахункова версія обраного для даного дослідження трициліндрового автомобільного дизеля ЗЧН 8,8/8,2 мала такі основні технічні характеристики табл.1.

Щодо основних конструктивних відмінностей від авангардного дизеля ЗДТНА то це б були:

- двоклапанна головка для безпосереднього упорскування палива зі зміщенням і нахилом осі форсунки відносно вертикальної осі циліндра; - поршні з відкритою камерою згоряння з локальною турбулізацією заряду без зміщення осі її циліндричної частини від вертикальної осі циліндра;

- паливний насос високого тиску з плунжерними парами діаметром 8 мм;
- форсунки закритого типу з гідромеханічним способом керування голкою, диференційним поршнем і модулятором імпульсів тиску;
- розведені на дві сторони впускний і випускний тракти;
- проміжне охолодження наддувного повітря та регулювання тиску наддування в залежності від частоти обертання та режиму роботи.

Таблиця 1. Очікувані технічні характеристики дизеля ЗЧН 8,8/8,2

Найменування показника та параметру	Розмірність	Числове значення
Заводський індекс		ЗДТНА1
Позначення		ЗЧН 8,8/8,2
Кількість циліндрів		3
Діаметр циліндра	мм	88
Хід поршня	мм	82
Робочий об'єм	дм ³	1,5
Ступінь стиснення		18,0
Номинальна потужність	кВт	63
Частота обертання КВ при номінальній потужності	хв ⁻¹	3600
Максимальний крутний момент	Нм	190
Частота обертання КВ при максимальному крутному моменті	хв ⁻¹	2000
Максимальний тиск палива перед сопловими отворами форсунок	МПа	165
Максимальний тиск згоряння	МПа	15,0
Середній ефективний тиск на режимі номінальної потужності	МПа	1,39
Ефективний ККД	%	36,1
Індикаторний ККД	%	45,7
Механічний ККД	%	79
Мінімальна питома витрата палива	г/(кВт · год)	235

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження полягає у визначенні впливу архітектури гібридної силової установки (ГСУ) (последовної та паралельної) на економічні та екологічні показники роботи малолітражного дизельного двигуна ЗЧН 8,8/8,2 у складі транспортного засобу категорії М1, N1 з використанням програмного середовища Simcenter Amesim.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні вирішуються такі завдання:

1. Провести структурно-функціональний аналіз особливостей паралельної та послідовної схем гібридного приводу в контексті застосування дизелів.
2. Розробити математичні моделі транспортного засобу з гібридною силовою установкою у середовищі Simcenter Amesim з урахуванням реальних характеристик дизеля ЗЧН 8,8/8,2.
3. Задати типові режими руху згідно з європейським їздовим циклом NEDC та провести моделювання роботи кожної конфігурації ГСУ.
4. Проаналізувати та порівняти результати за основними експлуатаційними показниками: питома

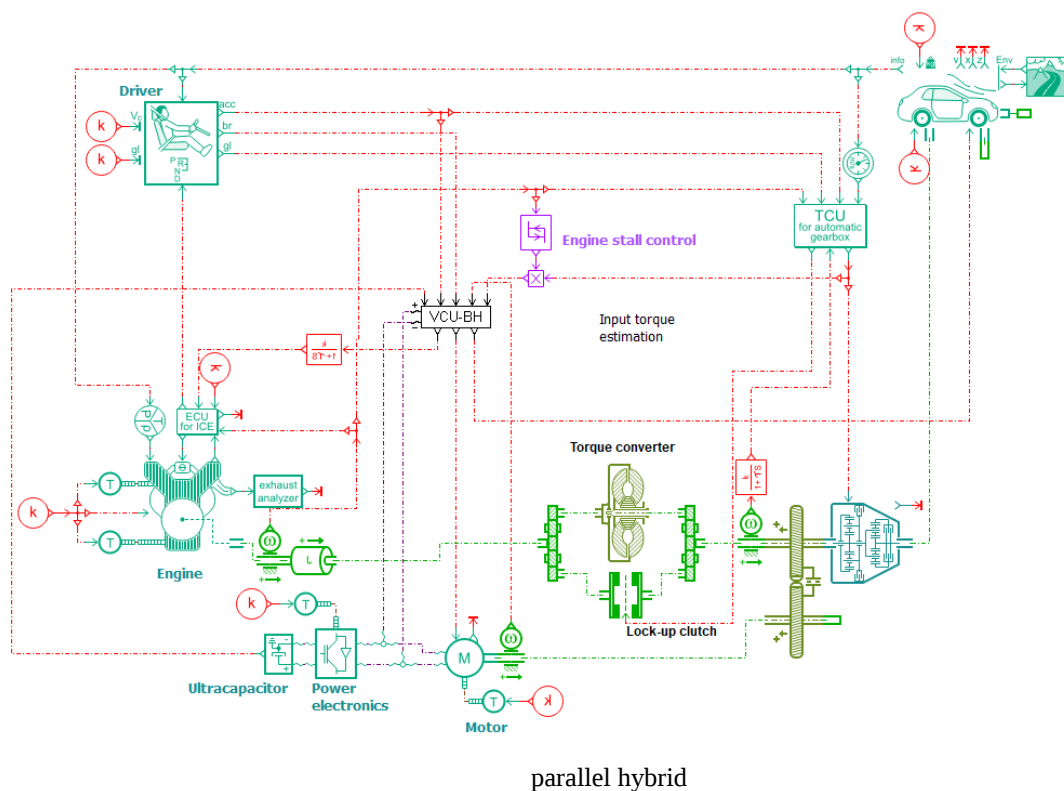
витрата палива, викиди CO, HC, NOx, ефективність роботи.

5. Надати техніко-аналітичну оцінку доцільності застосування кожної схеми приводу з урахуванням потенційних сценаріїв використання у спеціалізованому транспорті.

Розробка моделі дослідження у середовищі Simcenter Amesim

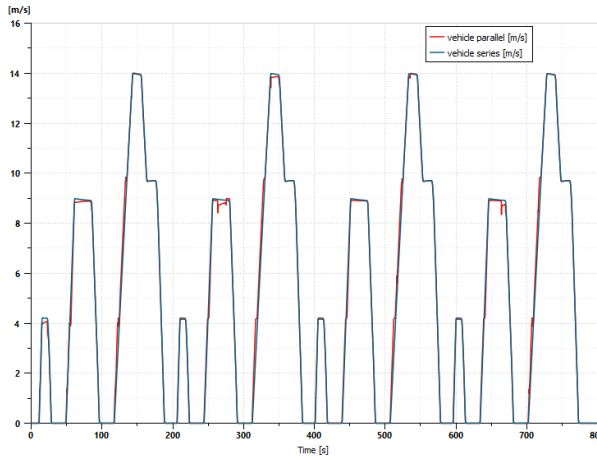
Комп'ютерне моделювання засобами спеціалізованого програмного забезпечення AMESim (Advanced Modeling Environment for performing Simulations) [10] забезпечує можливість детального дослідження робочих параметрів дизеля в різних експлуатаційних режимах та умовах інтеграції з гібридною системою. Це дозволяє на етапі проектування визначити оптимальні параметри налаштування силової установки та спрогнозувати її експлуатаційні характеристики.

У середовищі Simcenter Amesim було реалізовано дві математичні моделі. Моделі дослідження паралельної та послідовної схеми наведено на рис.2, 3

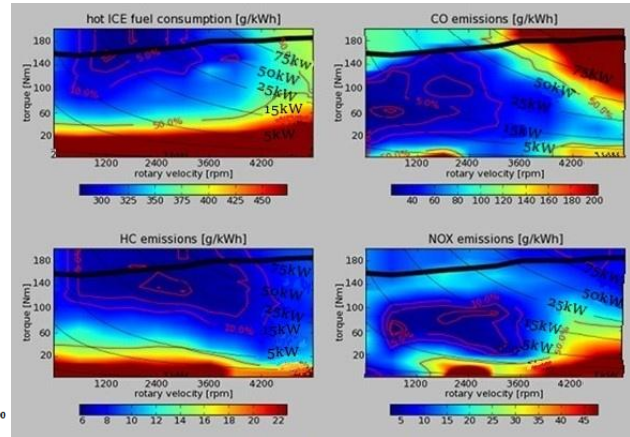


чність траєкторій у паралельній та послідовній схемах (рис. 4а). Відхилення не перевищують 1 м/с на окремих етапах циклу. Це підтверджує коректність налаштування обох моделей щодо здатності підтримувати цільовий профіль руху. Проте слід зазначити, що саме паралельна схема виявилась більш

чутливою до динамічних навантажень. Її відгук на зміну режиму руху є швидшим, що пов'язано з можливістю одночасного використання потужності ДВЗ та електромотора. Це забезпечує вищу адаптивність системи до нестабільних режимів експлуатації.



а)



б)

Рис. 4. Завдання профілів швидкості (а) та характеристик досліджуваного дизеля (б) в програмному середовищі Amesim

Поведінка двигуна внутрішнього згорання

Характеристики досліджуваного двигуна наведено на рис.4б. На основі діаграм навантаження двигуна як функції частоти обертання (рис. 5) можна стверджувати, що послідовна схема характеризується суттєво меншою варіативністю робочих режимів ДВЗ. У цій конфігурації двигун функціонує здебільшого у вузькому діапазоні частот обертання (близько 1300–2100 хв⁻¹) та помірних навантажень

(0,35–0,6). Такий режим відповідає зоні максимальної паливної ефективності. Натомість у паралельній схемі двигун працює у ширшому діапазоні — як за обертами (800–2800 хв⁻¹), так і за навантаженням (до 0,9), з наявністю частих переходів між режимами. Це призводить до підвищеного енергоспоживання, зниження середнього ККД, а також до збільшення термічного навантаження на циліндропоршневу групу.

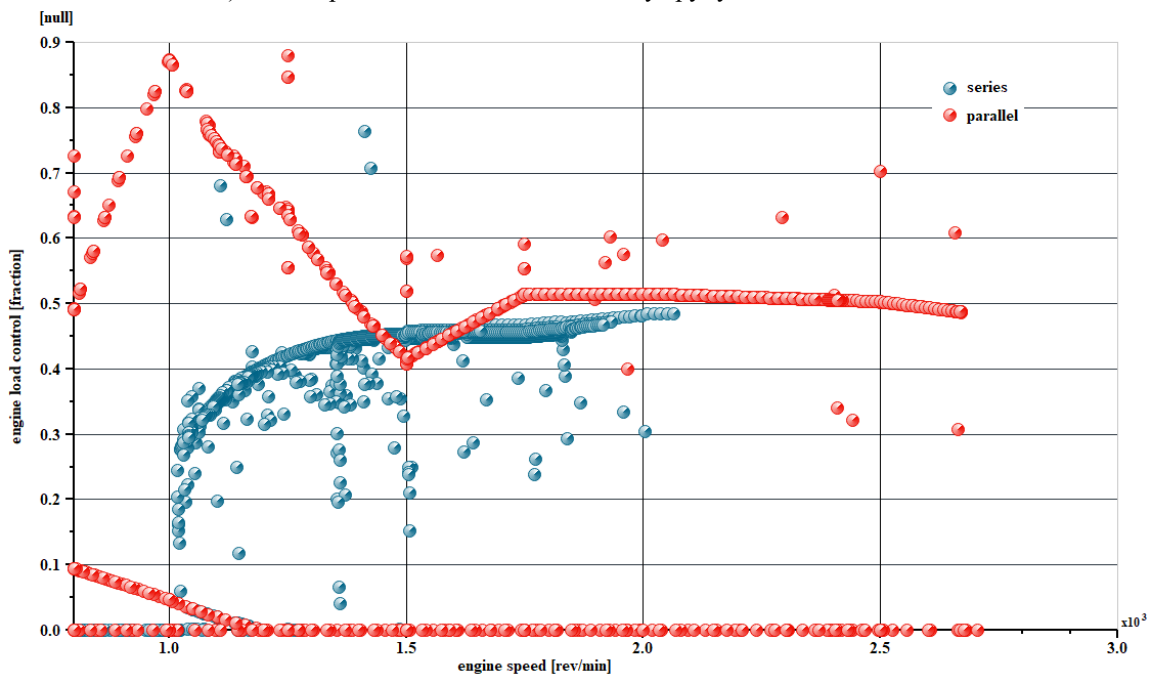


Рис. 5. Мапи навантаження двигуна

Динаміка стану заряду акумулятора

Графік зміни стану заряду SOC (State of Charge) акумуляторної батареї (рис. 6) демонструє переваги послідовної схеми щодо швидкості та стабільності заряджання. У цьому випадку ДВЗ використовується як генератор з фіксованими оптимальними параметрами роботи, що дозволяє швидко поповнювати енергетичний баланс системи. Послідовна

схема досягає рівня заряду понад 97% вже протягом перших 300 секунд. Паралельна конфігурація, навпаки, демонструє повільніше нарощування заряду та стабілізується на нижчому рівні (~93–94%). Цей аспект є критичним у випадках, коли транспортний засіб працює в умовах з обмеженими можливостями рекуперації.

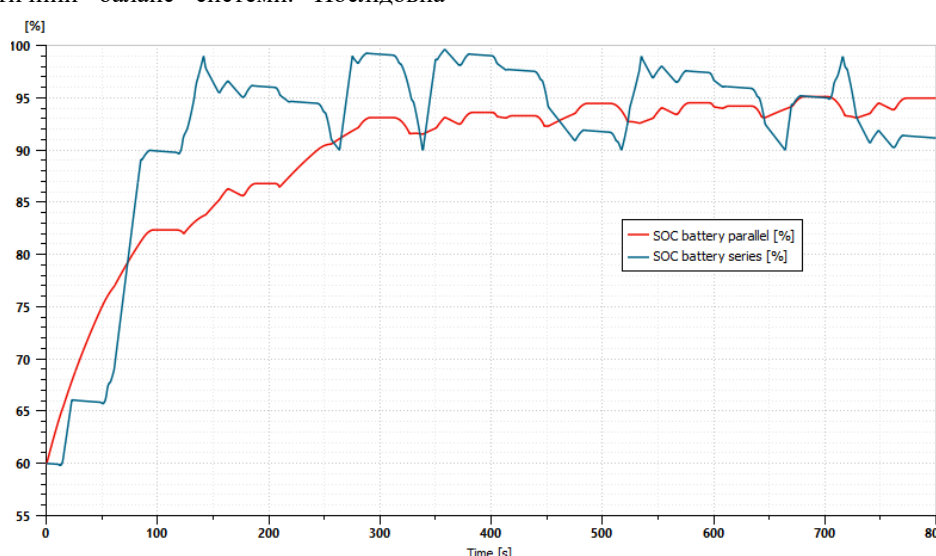


Рис. 6. Графік зміни стану заряду акумуляторної батареї

Питома витрата палива

Незважаючи на те, що послідовна схема теоретично повинна мати перевагу в паливній економічності, результати моделювання свідчать про практично ідентичні показники витрати пального для обох конфігурацій (рис. 7). Загальна різниця не перевищує 2% і знаходиться в межах статистичної похибки для такого типу моделювання. Це може бути

зумовлено балансуванням ефекту високого ККД стаціонарного режиму ДВЗ (у послідовній схемі) з гнучкістю тягового приводу (у паралельній схемі), що дозволяє останній уникати надлишкового використання двигуна в умовах неефективного навантаження.

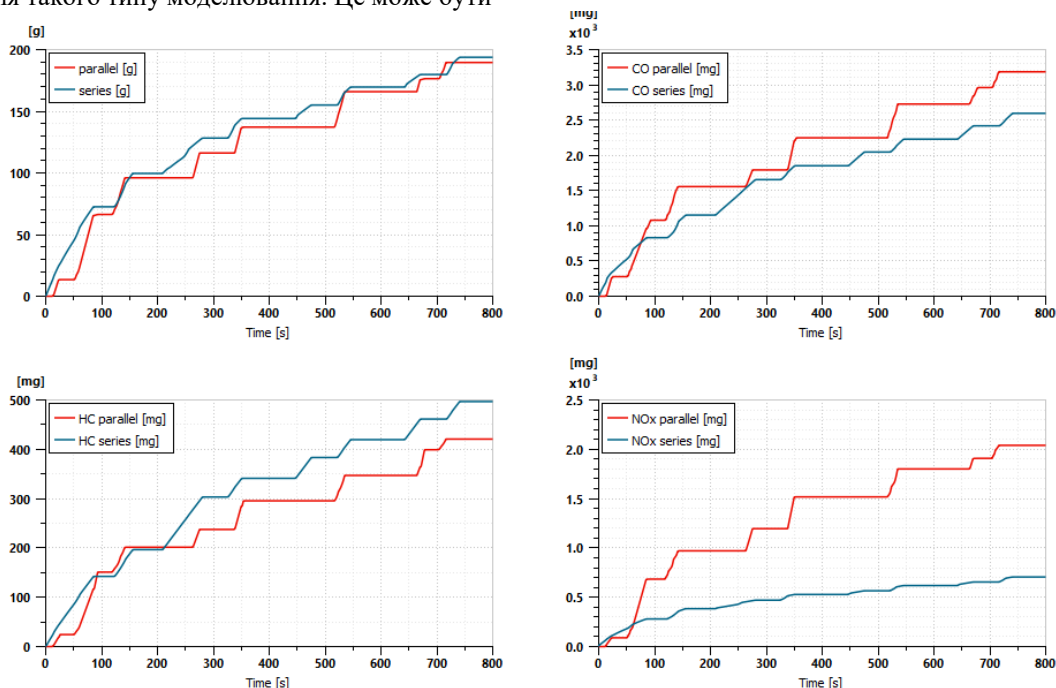


Рис. 7. Експлуатаційні характеристики двигуна

Екологічні характеристики

Викиди CO. Послідовна схема демонструє стабільно нижчі значення викидів чадного газу CO (рис. 7). Це пояснюється ефективнішим згоранням пального за умов стабільного, контрольованого режиму роботи ДВЗ. У паралельній схемі через часті переходи можливе неповне окислення пального, що зумовлює вищі значення CO.

Викиди HC. Цікаво, що викиди незгорілих вуглеводнів (HC) виявились нижчими у паралельній схемі (рис. 4). Це свідчить про ефективну термічну обробку суміші у фазах прискорення, де температури в циліндрах достатні для повного згорання, навіть за умов короткочасної дії.

Викиди NOx. Найбільш значуща відмінність спостерігається за рівнем викидів оксидів азоту NOx (рис. 7). Паралельна схема демонструє суттєве перевищення концентрацій NOx — на рівні 1,5–1,7 рази у порівнянні з послідовною. Це є прямим наслідком роботи ДВЗ у ділянках з високим навантаженням і підвищеною температурою згорання, де умови сприяють інтенсивному утворенню термічних NOx. Послідовна схема, навпаки, забезпечує помірну температуру згорання за рахунок обмеженого діапазону навантаження та сталості частот обертання, що дуже важливо за умов введення стандарту Euro 7.

При цьому ні карту емісії твердих частинок, ні інші фізичні моделі щодо цього питання, на проведеному етапі дослідження задіяно у програмному середовищі не було.

Сукупність отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що послідовна гібридна конфігурація має перевагу за більшістю параметрів енергоефективності та екологічності. Основні вигоди включають стабільну роботу ДВЗ у зоні максимального ККД, ефективне заряджання акумуляторної батареї, а також суттєво нижчі викиди оксидів азоту та чадного газу. Водночас паралельна схема зберігає свою актуальність у випадках, де ключовим є забезпечення гнучкої тягової відповіді, високої динаміки та мінімізації незгорілих залишків (HC), хоча й потребує додаткових заходів з контролю викидів NOx

Висновки

У результаті дослідження було реалізовано порівняльне моделювання роботи малолітражного дизельного двигуна ЗЧН 8,8/8,2 у складі гібридної силової установки з двома базовими архітектурами — паралельною та послідовною. На основі імітаційних моделей, побудованих у середовищі Simcenter Amesim, та аналізу експлуатаційних режимів згідно з їздовим циклом NEDC сформульовано такі основні висновки:

1. **Питома витрата палива** виявилася практично однаковою для обох схем. Незважаючи на теоретичну перевагу послідовної архітектури в частині ста-

ціонарної роботи ДВЗ, отримані значення відрізняються менш ніж на 2%, що не дозволяє стверджувати про перевагу однієї конфігурації за критерієм паливної економічності.

2. **Екологічні показники** демонструють чітку перевагу послідовної схеми за концентраціями CO та NOx. Зокрема, викиди CO у послідовній конфігурації нижчі завдяки стабільній роботі ДВЗ в оптимальному режимі. Найбільш значущою виявилася різниця у рівні NOx — у паралельній схемі вони були суттєво вищими, що зумовлено високими температурними піками під час динамічних навантажень.

3. **Показники викидів HC** (незгорілі вуглеводні), навпаки, виявились нижчими у паралельній схемі. Це пояснюється короткочасним підвищенням температури згорання під час прискорень, що сприяє повнішому окисленню вуглеводневої фази.

4. **Динамічна ефективність** приводу є вищою у паралельній архітектурі. Можливість одночасного використання потужності ДВЗ та електромотора забезпечує кращу адаптацію до змін режиму руху та позитивно впливає на реакцію силової установки.

5. **Дизельний двигун ЗЧН 8,8/8,2**, хоча й розроблений у попередні десятиліття, продемонстрував задовільні техніко-експлуатаційні показники та потенціал адаптації до сучасних вимог гібридизації. Його застосування є доцільним у контексті спеціалізованого транспорту, де пріоритетом є економічність, автономність та надійність.

6. **Середовище Simcenter Amesim** підтвердило свою ефективність як інструмент цифрового моделювання для аналізу енергетичних і екологічних характеристик гібридних силових установок, що дозволяє зменшити потребу у фізичному прототипуванні на ранніх етапах проектування.

Отримані результати є практично значущими для задач попереднього вибору конфігурації гібридного приводу, з урахуванням реальних режимів роботи, вимог до динаміки, енергозбереження та відповідності екологічним нормативам. На наступних етапах дослідження середовище Simcenter Amesim дозволяє додатково задіяти і карту, або інші моделі, емісії твердих частинок.

Список літератури:

1. Lee S. Control oriented model for real-time mean-value diesel engine / S. Lee, J. Chung, H. Lee // *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers-2018-№26(2)-с.211–220* DOI:10.7467/KSAE.2018.26.2.211
2. Jehlik F. Fuel consumption effects of a Diesel hybrid electric vehicle across a range of driving styles and ambient conditions. / F. Jehlik, E. Rask, S. Magand, E. Condemine // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo - ITEC 2015*, art. no. 07165781. DOI: 10.1109/ITEC.2015.7165781
3. Tsuchiya T. Study of practical hybrid commercial vehicles. / T. Tsuchiya // *Proceedings of the 30th Chinese Control Conferenc - CCC 2011-art. no. 6001621, pp. 6163 – 6165.*

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.08053083437&partnerID=40&md5=90e27b3616098fb0f109b040a307ccf2> 4. Viswanath H. Optimisation of diesel engine for hybrid military tracked vehicles using Matlab-Simulink. / H. Viswanath, A. Kumaraswamy, P. Sivakumar // *Defence Science Journal* – 2017 - №67 (4) - pp. 360 – 369. DOI: 10.14429/dsj.67.11490 5. Laurén M., General-Purpose and Scalable Internal-Combustion Engine Model for Energy-Efficiency Studies / M. Laurén, G. Goswami, A. Tupitsina, S. Jaiswal, T. Lindh, J. Sopanen / *Machines* – 2022 - №10 (1) - art. no. 26. DOI: 10.3390/machines10010026 6. Ortenzi F., Exhaust Energy Recovery with Variable Geometry Turbine to Reduce Fuel Consumption for Microcars / F. Ortenzi, A. Genovese, M. Carrazza, F. Rispoli, P. Venturini // *SAE Technical Papers* -, 2018-September DOI: 10.4271/2018-01-1825 7. Дизель 3ДТА. Керівництво з експлуатації 3ДТА.КЕ. – Харків: ХКБД, 2005. – 83 с. 8. Техніко-економічне обґрунтування необхідності державної підтримки у виконанні інноваційно-інвестиційного проекту «Розроблення та впровадження у виробництво малолітражного автомобільного дизеля потужністю 100-175 к.с. подвійного призначення (Слобожанський дизель)»: монографія / Ф.І. Абрамчук, С.О. Альохін, М.Л. Белов та інші. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 164 с. 9. Грицюк О.В. Науково-технічний і виробничий потенціал України щодо виготовлення наукоємної продукції дизелебудування / О.В. Грицюк, А.П. Кузьменко, Б.О. Лазченко, В.В. Копилов // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2024. – № 2. – С. 31-41 10. Simcenter Amesim // Офіційний сайт Siemens. Режим доступу до сайту: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>

Bibliography (transliterated):

1. Lee S., Chung J., Lee H. (2018), Control oriented model for real-time mean-value diesel engine. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 26 (2), pp. 211 – 220 DOI:

10.7467/KSAE.2018.26.2.211 2. Jehlik F., Rask E., Magand S., Condemine E. (2015) Fuel consumption effects of a Diesel hybrid electric vehicle across a range of driving styles and ambient conditions. 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2015, art. no. 07165781. DOI: 10.1109/ITEC.2015.7165781 3. Tsuchiya T. (2011) Study of practical hybrid commercial vehicles. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, CCC 2011*, art. no. 6001621, pp. 6163 – 6165. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80053083437&partnerID=40&md5=90e27b3616098fb0f109b040a307ccf2> 4. Viswanath H., Kumaraswamy A., Sivakumar P. (2017) Optimisation of diesel engine for hybrid military tracked vehicles using Matlab-Simulink. *Defence Science Journal*, 67 (4), pp. 360 – 369. DOI: 10.14429/dsj.67.11490 5. Laurén M., Goswami G., Tupitsina A., Jaiswal S., Lindh T., Sopanen J. (2022) General-Purpose and Scalable Internal-Combustion Engine Model for Energy-Efficiency Studies. *Machines*, 10 (1), art. no. 26. DOI: 10.3390/machines10010026 6. Ortenzi F., Genovese A., Carrazza M., Rispoli F., Venturini P. (2018) Exhaust Energy Recovery with Variable Geometry Turbine to Reduce Fuel Consumption for Microcars. *SAE Technical Papers*, 2018-September. DOI: 10.4271/2018-01-1825 7. Дизель 3ДТА. Manual for using 3ДТА.КЕ. – Харків: ХКБД, 2005. – 83 с. 8. Abramchuk F.I., Alyokhin S.O., Bielov M.L. & others (2012) Technical and economic substantiation of the need for state support in the implementation of the innovation and investment project "Development and implementation in the production of a small car diesel engine with a capacity of 100-175 hp. dual purpose (Slobzhansky diesel)" [Tekhniko-ekonomichne obhruntuvannia neobkhidnosti derzhavnoi pidtryмки u vykonanni innovatsiino-investytsiinoho proektu «Rozroblennia ta vprovadzhennia u vyrobnytstvo malolitrazhnogo avtomobilnogo dyzelia potuzhnistiu 100-175 k.s. podviinoho pryznachennia (Slobzhanskyi dyzel)»]. *KhNADU, Kharkiv*, 164 p. 9. Grytsyuk O.V., Kuzmenko A.P., Lazchenko B.O., Kopylov V.V.. (2024) Scientific, technical and production potential of Ukraine for the production of high-tech diesel engine products [Naukovo-tekhichniy i vyrobnychyi potentsial Ukrainy shchodo vyhotovlennia naukoiemnoi produktsii dyzelebudu-vannia] // *Internal combustion engines No. 2.* – P. 31-41. 10. Simcenter Amesim//Official Simens site, available at: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>

Грицюк Олександр Васильович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: dthkdb@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5596-6254>.

Врублевський Олександр Миколайович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри будівництва та експлуатації транспортних засобів і машин, Факультет технічних наук, Вармінсько-Мазурський університет в м. Ольштин, Польща, e-mail: aleksander.wroblewski@uwm.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-5871-6381>

Кузьменко Анатолій Петрович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: kuzmatolja@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4029-4010>

Кузьменко Сергій Сергійович – аспірант двигунів та гібридних енергетичних установок, національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kusmenko.ss@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-5361-8879>

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A DIESEL ENGINE IN PARALLEL AND SERIES HYBRID POWER PLANTS OF A VEHICLE USING AMESIM

O.V. Grytsyuk, O.M. Vrublevskiy, A.P. Kuzmenko, S.S. Kuzmenko

This article presents the results of a comparative study on the operation of a small-displacement diesel engine 3ChN 8.8/8.2 within a hybrid powertrain system of a transport vehicle. The research was conducted by developing simulation models in the Simcenter Amesim environment for two basic hybrid drive architectures — parallel and series configurations. Currently, governments of many countries are implementing stringent emission standards for harmful substances (particularly NO_x, CO, CO₂, HC), which requires vehicle manufacturers to implement innovations in powertrain technology. The developers of the Euro 7 standard, which is set to come into force in 2025, clearly understand that tightening certain requirements, such as particulate matter emissions, has practically reached its limits, while establishing even stricter NO_x emission limits for diesel vehicles remains possible, which also required attention. Therefore, within the scope of this research, the impact of each configuration on fuel economy, emission levels of harmful substances (CO, HC, NO_x), and overall powertrain efficiency during typical urban and mixed driving modes (NEDC cycle) was analyzed. Special attention was given to the technical and functional feasibility of using a small-displacement diesel engine as an energy source in modern hybrid power systems, considering its design features, load

characteristics, and adaptability to environmental constraints. The obtained results demonstrate comparable fuel efficiency of both configurations, significant advantage of the series architecture in reducing CO and NO_x emissions, and lower HC levels in the parallel configuration. Meanwhile, the parallel configuration demonstrates higher dynamic flexibility and adaptability under variable driving conditions. The research has practical applications and is aimed at developing energy-efficient technologies in the field of specialized vehicles for military, expeditionary, or commercial purposes, where the combination of reliability, autonomy, and environmental compliance is particularly relevant. It was determined that the 3ChN 8.8/8.2 diesel engine demonstrated satisfactory technical and operational performance and adaptation potential to modern hybridization requirements. Its application is also feasible in the context of specialized transport, where economy, autonomy, and reliability are priorities.

Keywords: diesel; hybrid drive; operating modes; specific fuel consumption; Environmental indicators.

УДК 621.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.09

О.С. Шевченко, О.Ю. Лінков, А.В. Савченко

АНАЛІЗ ТА КАЛІБРУВАННЯ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Забезпечення надійної, стабільної та ефективної роботи дизельного двигуна неможливе без точного контролю ключових параметрів паливної апаратури, серед яких особливу роль відіграє тиск палива в магістралі високого тиску. Динаміка зміни цього тиску дозволяє оперативно оцінювати технічний стан форсунок, паливного насоса високого тиску та інших елементів паливної системи. Сучасні електронні системи керування двигуном (включаючи рішення класу IoT) оперують значними обсягами даних, що вимагає створення високо-точних і швидкодіючих систем збору, обробки й аналізу даних у реальному часі. Одним з критичних елементів таких систем є датчик тиску палива, вибір якого має базуватися на ряді технічних критеріїв: достатній діапазон вимірювання (до 180 МПа і більше), висока частота відгуку (не менше 1 кГц), точність не гірше $\pm 1\%$, стійкість до температурних коливань та вібрацій, а також сумісність з апаратними і програмними засобами мікроконтролерів, зокрема Arduino Portenta H7. Додаткові вимоги обумовлені потребою універсальності — використання одного датчика як у сучасних двигунах із системою Common Rail, так і у старіших дизельних системах. Для коректної діагностики пульсацій тиску, які виникають при відкритті та закритті форсунок, необхідно забезпечити частоту вибірки не менше 24 кГц при максимальній частоті обертання колінчастого валу 4000 хв^{-1} . Це накладає вимоги як до характеристик самого датчика, так і до швидкодії мікроконтролера та АЦП. Для зниження навантаження на комунікаційні канали та сервери застосовано підхід туманних обчислень (edge computing), що дозволяє виконувати попередню обробку сигналів безпосередньо на рівні пристрою збору даних. У статті представлено методику вибору та калібрування н'єзрезистивного датчика Bosch 0281006188 для моніторингу тиску палива, а також результати аналізу лінійності та похибок вимірювання. Показано, що досягнута сумарна похибка становить $\sim 1\text{--}2\%$, що є прийнятним для задачі моніторингу технічного стану паливної апаратури дизельного двигуна в умовах експлуатації.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; моніторинг тиску палива; вимірювання; діагностика форсунок; IoT; туманні обчислення; Arduino Portenta H7; н'єзрезистивний датчик; точність; похибка.

Вступ

Параметри роботи паливної апаратури безпосередньо впливають на ефективність і ресурс дизельного двигуна. Одним із найінформативніших параметрів є тиск палива у магістралі високого тиску. Аналіз динаміки зміни тиску дозволяє своєчасно виявити несправності форсунок, паливного насоса, фільтрів і інших елементів системи. У сучасних дизельних двигунах, а також у модернізованих старих конструкціях дедалі ширше застосовуються системи моніторингу на базі мікроконтролерів, що дозволяють реалізувати туманні обчислення (edge computing) для попередньої обробки великих обсягів даних безпосередньо на місці збору. Це підвищує ефективність аналізу і знижує навантаження на сервери та мережі. Для забезпечення достовірності вимірювань критично важливим є правильний вибір датчика тиску палива. Однак у ряді випадків публі-

чної документації на обрані промислові автомобільні датчики недостатньо, що вимагає проведення повного калібрування у власних умовах.

Аналіз публікацій та постановка задач дослідження

За даними фахових публікацій у галузі моніторингу паливних систем та діагностики двигунів, для адекватної фіксації швидкоплинних процесів необхідна частота вибірки не менше $10\text{--}250 \text{ кГц}$ [1–3]. Так, у дослідженні Domenico Crescenzo [1] повідомляється, що сигнали від датчиків тиску в дизельних двигунах знімають при частоті до 250 кГц. Інші роботи [2] показують, що відносна похибка при невисоких частотах вибірки до 5 % виникає, коли нормована частота перевищує певний поріг ($\sim 20\%$ від резонансної частоти датчика). Окрім того, обґрунтовується важливість динамічного калібрування тиску (не лише статичного) — саме для таких швидкоплинних процесів, як у паливних магістралях дизеля